

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Luka Pavlović

Zagreb, 2017..

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević-Lulić, dipl. ing.

Student:

Luka Pavlović

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorici Jurčević-Lulić na pomoći i uputama i djevojci Ivani na podršci.

Luka Pavlović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, broдостrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Luka Pavlović**

Mat. br.: 0035182464

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Biomehanički model tetiva prstiju ruke**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Biomechanical model of finger tendons**

Opis zadatka:

Zglobovi prstiju ruke su obavijeni i učvršćeni ligamentima. Na članke prstiju vežu se tetive ispružača i tetive pregibača prstiju koje su odgovorne za ispružanje, odnosno savijanje prstiju. U sportu su česte ozljede kod kojih dolazi do otrgnuća hvatišta tetive ispružača prsta na posljednjem članku prsta. Kod snažnog, iznenadnog udarca u vrh ispruženog prsta ili prilikom pada dolazi do trenutačnog, pretjeranog istezanja tetive koja puca u svom hvatištu. Ozljede su prisutne i u sportskom (slobodnom) penjanju i alpinizmu, a najčešće se događaju kada penjač naglo izgubi oslonac nogama i ostane visiti, a drži se hvatom s maksimalno istegnutim zadnjim člankom prsta i srednjim člankom savijenim pod pravim kutom.

U radu je potrebno:

- opisati građu prstiju na ruci,
- objasniti biomehanički model tetiva prstiju kao sustav remenica,
- objasniti i usporediti tri Landsmeerova modela tetiva prstiju ruke kao sustava remenica,
- odrediti kritična mjesta i procijeniti naprezanja tetiva kod slobodnog penjanja.

Antropomjere i potrebne podatke uzeti iz literature i u dogovoru s mentorom.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

25. studenog 2015.

Rok predaje rada:

1. rok: 25. veljače 2016

2. rok (izvanredni): 20. lipnja 2016.

3. rok: 17. rujna 2016.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 29.2., 02. i 03.03. 2016.

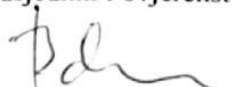
2. rok (izvanredni): 30. 06. 2016.

3. rok: 19., 20. i 21. 09. 2016.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Tanja Jurčević Lulić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS OZNAKA	III
udaljenost po osi kosti od središta rotacije interfalangealnog zgloba prsta do početka zakrivljenosti tetive.....	III
udaljenost nezakrivljenog dijela tetive od osi kosti	III
sila koja djeluje na tetive	III
površina poprečnog presjeka tetiva	III
SAŽETAK.....	IV
SUMMARY	V
1. UVOD.....	1
1.1. Kosti šake.....	1
1.2. Zglobovi šake	2
1.3. Mišići šake	4
1.3.1. Kratki mišići šake	4
1.3.2. Dugi mišići šake.....	5
1.4. Položaj tetiva dugi mišića u odnosu na falnealne kosti šake	7
1.5. Podjela mišića prema pomaku zglobova.....	9
2. LANDSMEEROVI MODELI TETIVA PRSTIJU KAO SUSTAV REMENICA	10
2.1 Tetive prstiju kao sustava remenica	10
2.2 Landsmeerovi modeli.....	10
2.3 Model I.....	10
2.4 Model II.....	12
2.5 Model III	13
2.6 Usporedba Modela I, II i III	15
3. Procjena naprežanja i opterećenja tetiva prstiju pri slobodno penjanju	16
3.1 Slobodno penjanje.....	16
3.2 Mjerenje sile na vrhu prstiju	17
3.3 Model tetiva kao sustav remenica	19
3.4 Procjena naprežanja u tetivama.....	20
4. ZAKLJUČAK.....	22
LITERATURA.....	23
PRILOZI.....	24

POPIS SLIKA

Slika 1	Kosti šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]	2
Slika 2	Zglobovi prsta šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]	3
Slika 3	Kratki mišići šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]	5
Slika 4	Dugi mišići šake, prednja loža i dio radijalne lože [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]	7
Slika 5	Položaj tetiva mišića podlaktice u šaci [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]	8
Slika 6	Prikaz Landsmeerovog Modela I [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.]	11
Slika 7	Prikaz Landsmeerovog Modela II [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.]	12
Slika 8	Prikaz Landsmeerovog Modela III [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.]	13
Slika 9	Geometrija zgloba Modela III	14
Slika 10	Najčešći <i>grip</i> -ovi [https://theclimbingdoctor.com/rock-climbing-pulley-injury/]	17
Slika 11	Šaka stabilizirana u položaj A za mjerenje [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]	18
Slika 12	Šaka stabilizirana u položaj B za mjerenje [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]	18
Slika 13	Model tetiva u položaju A [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]	19
Slika 14	Model tetiva u položaju B [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]	20

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
θ	rad	kut koji zatvaraju kosti šake u zgobovima prstiju
r_1	mm	udaljenost tetive od središta rotacije interfalangealnog zgloba prsta
x	mm	pomak tetive
r_2	mm	udaljenost geometrijskog sjecišta pravaca tetive i središta rotacije interfalangealnog zgloba prsta
r_3	mm	polumjer zakrivljenosti tetive u interfalangealnom zglobu prsta
h	mm	udaljenost tetive od središta rotacije interfalangealnog zgloba prsta s uračunatom pojavom <i>bowstringing</i> -a
y	mm	udaljenost po osi kosti od središta rotacije interfalangealnog zgloba prsta do početka zakrivljenosti tetive
d	mm	udaljenost nezakrivljenog dijela tetive od osi kosti
F	N	sila koja djeluje na tetive
A	mm ²	površina poprečnog presjeka tetiva

SAŽETAK

Opisana je anatomska građa lokomotornog sustava šake. Opisane su kosti u šaci te mišići u šaci i oni koji se hvataju u šaci te sudjeluju u aktuaciji šake te mehanički modeli kratanja tetiva mišića koji su uključeni u fleksiji i ekstenziji II do V prsta. Analizirani su rezultati istraživanja sile na kraju prstiju pri slobodnom penjanju i procjena naprezanja tetiva koje sudjeluju u prijenosu sila.

Ključne riječi: anatomija šake, mehanički model šake, Landsmeerovi model, naprezanje tetiva

SUMMARY

Locomotor anatomical makeup of hand is described. Hand bones and muscles that originate or end in hand and are part of hand locomotion of II to V finger are described. Results from free climbing hand grip force are analyzed and tendon force is assessed.

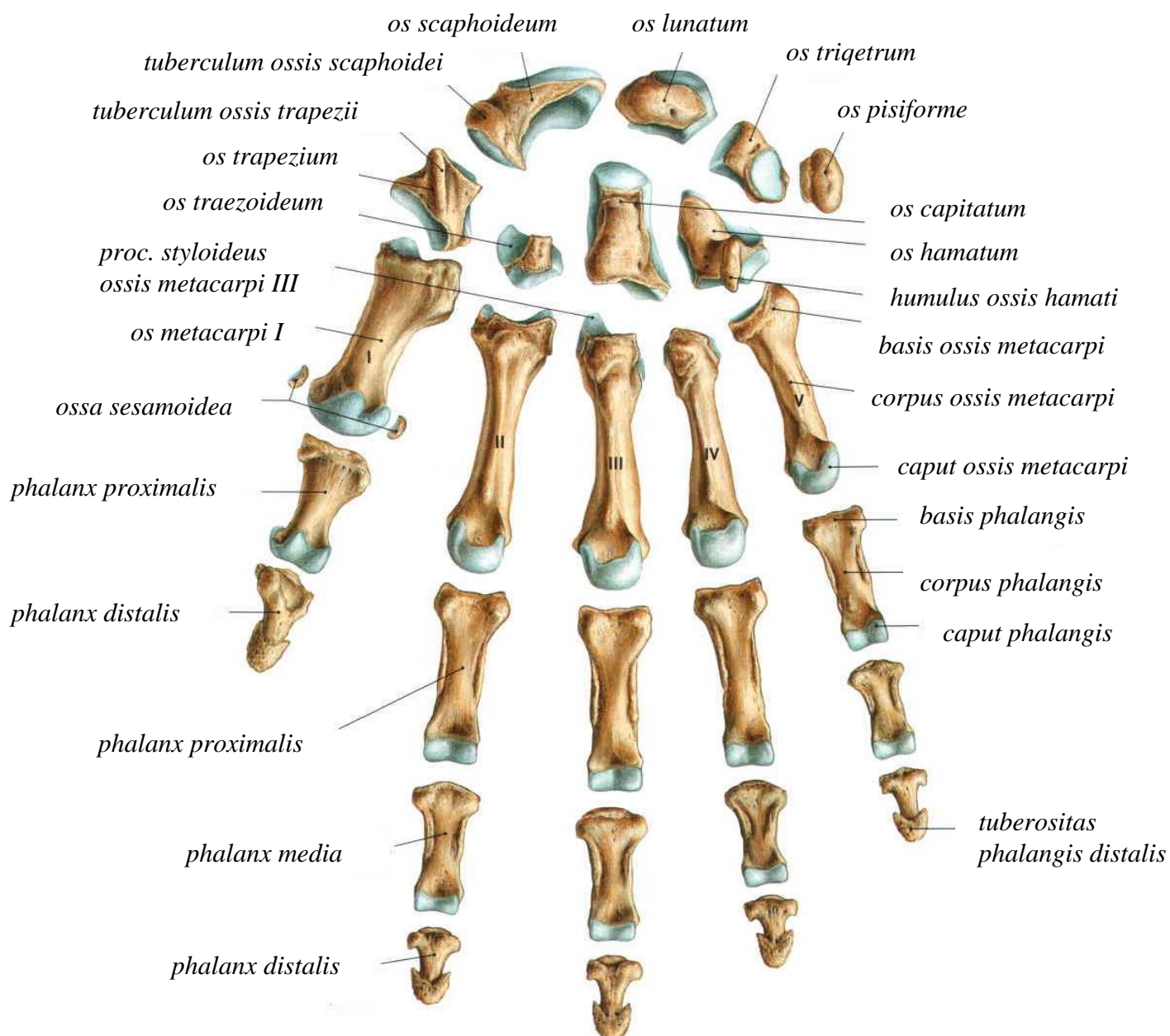
Key words: hand anatomy, mechanical hand model, Landsmeer model, tendon stress

1. UVOD

1.1. Kostii šake

Kosti šake su posložene u više redova i unutar njih se raspoznaju kosti korijena šake kako su prikazane u Slici 1 Kosti šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]. Kosti u korijenu šake su one kosti koje se nalaze u proksimalna dva reda kostiju šake, a oblikom i strukturom su različite od drugih kosti u šaci. (Proksimalno je bliže tijelu, dok je distalno dalje od tijela.) Kosti korijena šake su kratke kosti, dok su ostale kosti šake izdužene te postoje i dvije sezamoidne kosti (oblika sezama) uz proksimalnu palmarnu bazu proksimalne falange palca. (Palmarna strana šake je ona na strani dlana; falanga je duga kost prsta.)

Karpalne kosti su obavijene kompaktnom, a iznutra su građene od čvrste kosti. (Karpalne su kosti kosti pešća, dok su metakarpalne kosti zapešća.) Najproksimalnije su karpalne kosti, posložene u dva reda: u svakom redu po 4 kostiju. U proksimalnom redu, od lateralno prema medijalno: čunasta kost, *os scaphoideum*; polumjesečasta kost, *os lunatum*; trokutasta kost, *os triquetrum*; i graškasta kost, *os pisiforme*. (Medijalno se odnosi na bliže tijelu, a lateralno udaljenije od tijela.) Skafoidna i lunarna kost su u zglobu s palčanom kosti, *radius*. Distalni red kostiju čine, od lateralno prema medijalno: trapezna kost, *os trapezium*; trapezoidna kost, *os trapezoideum*; glavičasta kost, *os capitatum*; i kukasta kost, *os hamatum*. One su u zglobu s idućim redom kostiju šake: metakarpalnim kostima, *ossa metacarpalia*. Njih ima pet, a numerirane su od lateralno prema medijalno. Oblikuju ih distalno glava, *caput*; tijelo, *corpus*; i proksimalno osnovica, *basis*. Na njih se nastavljaju kosti prstiju, falange. Svaki prst ih ima tri: proksimalnu, mediu i distalnu, a palac ih ima samo dvije. Falange su također građene od osnovice, tijela i glave, osim distalnih falangi koje završavaju pločom *tuberositas phalangis digitalis*. [Werner Platzer, Anatomska atlas 1 (Priručni), Zagreb, 2011.] Prsti su anatomska numerirani od I do V gdje se prst I odnosi na palac, prst II na kažiprst, prst III na srednjak, prst IV na prstenjak i prst V na mali prst. [Fanghanel, Pera, Anderhuber, Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, Zagreb, 2009.]

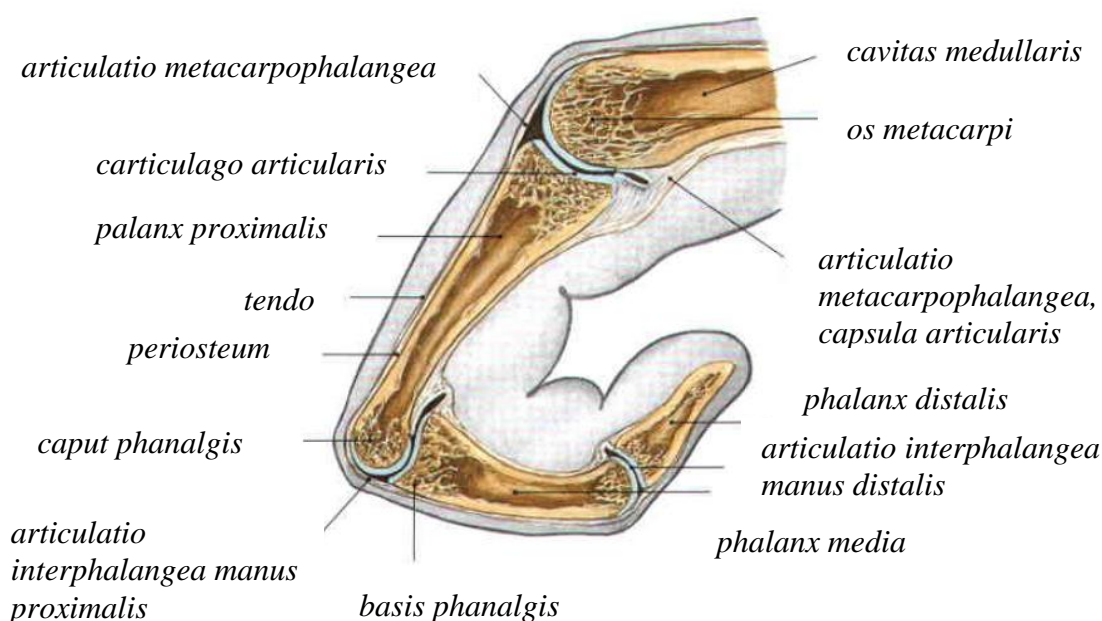


Slika 1 Kosti šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]

1.2. Zglobovi šake

U šaci su četiri zglobova za svaki prst i imenovani su prema kostima koje sudjeluju u zglobovima. Zglobovi su prikazani na Slici 2 Zglobovi prsta šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]. Uz svaki zglob će se prikazati i uvriježena skraćenica. Oni su od proksimalno prema distalno: karpometakarpalni zglob (CMC), metakarpofalangealni zglob

(MCP), proksimalni interfalangealni zglob (PIP) i distalni interfalangealni zglob (DIP). CMC zglob je građen od zglobnih površina distalnih dijelova distalnog reda karpalnih kostiju i osnovica četiri metakarpalnih kostiju. Kretnje su ograničene oblikom zglobnih površina i ligamentima. To je kruti zglob, amfiartroza, i dopušta vrlo ograničene kretanje. CMC zglob s prvom metakarpalnom kosti i trapeznom kosti je sedlasti zglob i svaka zglobna površina je i konveksna i konkavna, u okomitim presjecima. Moguće kretanje su ekstenzija, fleksija, palmarna i radijalna abdukcija, adukcija i rotacija. Kretnje zglobova ograničavaju ligamenti i imenovani su prema svojem položaju. Oko zglobova šake su karpometakarpalni ligamenti *ligg. carpometacarpalea* i metakarpalni ligamenti *ligg. metacarpea*. MCP zglobovi su kuglasti s mlohavom zglobnom čahurom. Zglobne površine su od glava metakarpalnih kostiju i osnovica proksimalnih kostiju. Zglobna čahura je pojačana na palmarnoj strani s vezivnom hrskavicom i s *ligg. palmaria*, a kretanje abdukcije i adukcije su ograničeni s *ligg. collateralia*. PIP i DIP zglobovi su kutni gdje su moguće samo kretanje fleksije i ekstenzije. Zglob je osiguran kolateralnim ligamentima *ligg. collateralia* i palmarnim ligamentima *ligg. palmaria* [Fanghanel, Pera, Anderhuber, Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, Zagreb, 2009.].



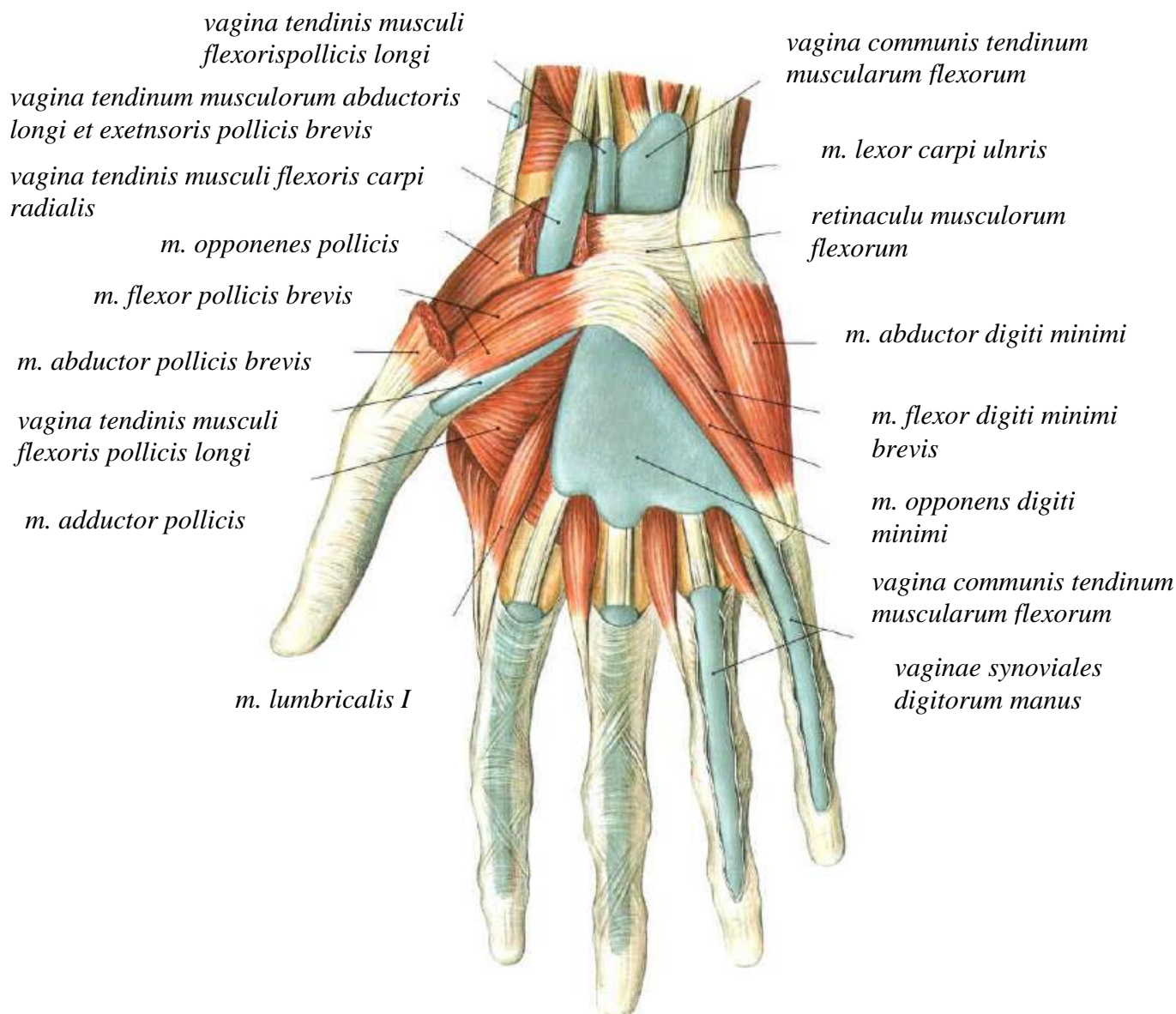
Slika 2 Zglobovi prsta šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]

1.3. Mišići šake

Mišići šake se mogu podijeliti na kratke mišiće i duge mišiće. Kratki mišići su smješteni u šaci, a dugi mišići su smješteni u podlaktici. Dugi mišići su veći i duži i omogućuju šaci pokrete manje preciznosti, ali velike snage. Oni osiguravaju prijenos velikih sila na prste. Kratki su mišići namijenjeni preciznoj koordinaciji prstiju te u odnosu na duge mišiće mogu izraziti razmjerno male sile. Dok dugi mišići većinom služe za fleksiju i ekstenziju, kratki mišići služe također adukciji i abdukciji te omogućuju fine pokrete poput pisanja [Fanghanel, Pera, Anderhuber, Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, Zagreb, 2009.]. Razmotreni će biti samo oni mišići koji sudjeluju u fleksiji i ekstenziji kažiprsta, srednjeka, prstenjaka i malog prsta, tj. II do V prsta šake.

1.3.1. Kratki mišići šake

Kratki mišići šake se dalje dijele na mišiće palca, mišiće sredine šake i mišiće malog prsta [Fanghanel, Pera, Anderhuber, Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, Zagreb, 2009.] i prikazani su na Slici 2 Kratki mišići šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]. Mišići palca su kratki abduktor palca, *m. abductor pollicis brevis* s ishodištem u *retinaculum flexorum* i hvatištem na rubu proksimalne falange palca; kratki fleksor palca, *m. flexor pollicis brevis* s ishodištem u *retinaculum flexorum* i *os trapezium et os trapezoideum et os capitatum* i hvatištem na proksimalnoj falangi palca; aduktor palca, *m. adductor pollicis* s polazištem na palmarnoj strani metakarpalnih kosti II i III i s hvatištem na bazi proksimalne falange palca; i opozitor palca, *m. opponens pollicis* s polazištem na *retinaculum flexorum* i hvatištem na *os metacarpale I*. Mišići sredine šake su palmarni i dorzalni međukoštani mišići, *mm. interossei palmares et dorsales*; te lumbrikalni mišići, *mm. lumbricales*. Interosealni mišići polaze od metakarpalnih kostiju i vežu se za proksimalne falange i prste privlače trećem prstu. Lumbrikalni mišići polaze od tetiva mišića dubokog fleksora prstiju i također se vežu na proksimalne falange, a služe za razdvajanje prstiju. [Fanghanel, Pera, Anderhuber, Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, Zagreb, 2009.]



Slika 3 Kratki mišići šake [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]

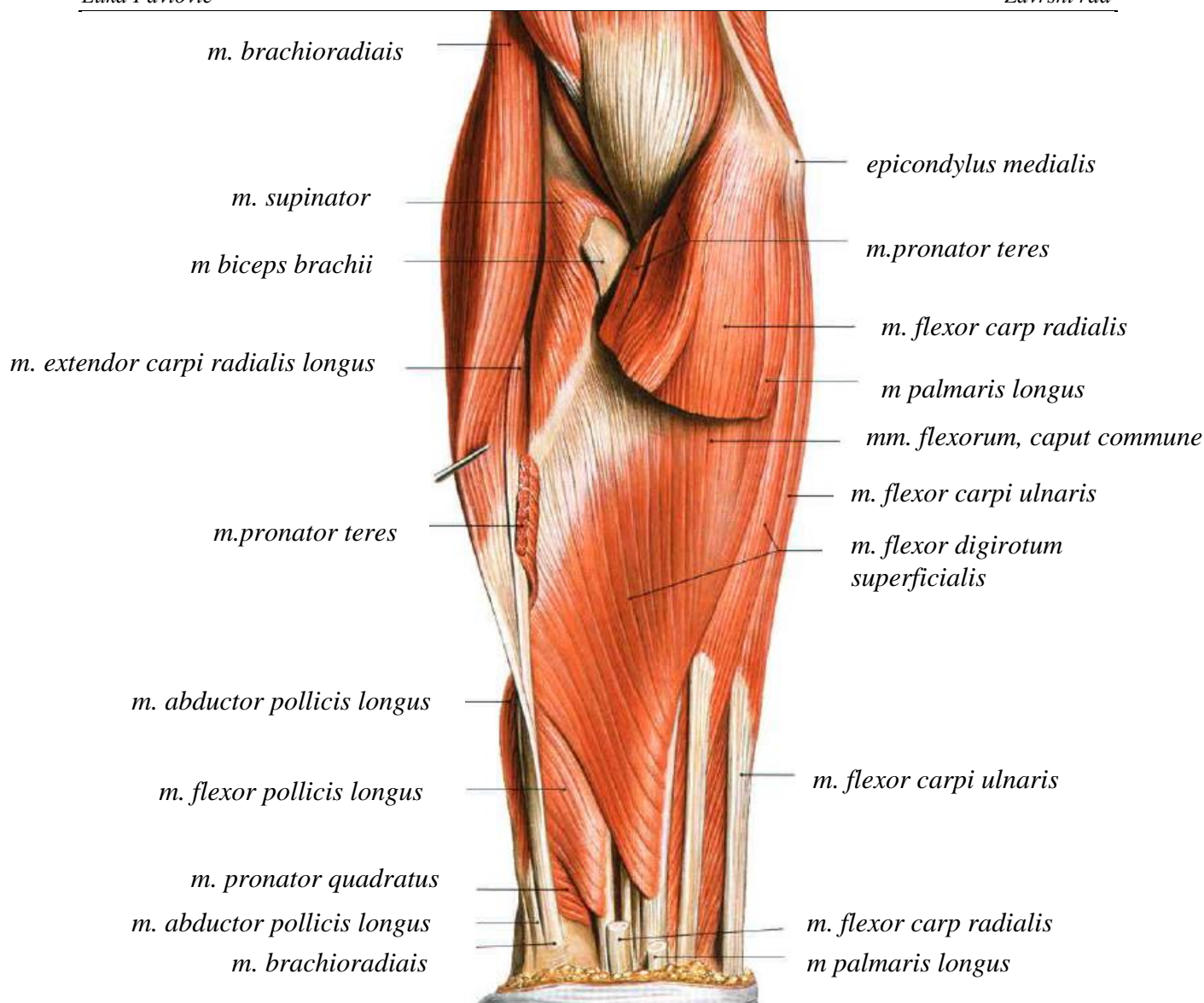
1.3.2. Dugi mišići šake

Dugi mišići se mogu podijeliti na tri lože: prednju, stražnju i radijalnu i prikazani su na Slici 4. Dugi mišići šake, prednja loža i dio radijalne lože [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]. Iz prednje lože polaze fleksori: duboki fleksor prstiju, *m. flexor digitorum profundus* (FDP) s polazištem s međukoštane podlaktične membrane, *fascia interossea antebrachii*, i hvata se na baze distalnih falangi II do V prsta; i površinski fleksor prstiju, *m.*

digitorum superficialis (FDS) s polazištem s medijalnog epikondila nadlaktične kosti, *epicondylus medialis humeri*, i s hvatištem na bazama srednjih falangi II do V prsta. Oba mišića sudjeluju u fleksiji prstiju. U prednjoj se loži također nalazi dugi palmarni mišić, *m. palmaris longus*. On polazi s medijalnog epikondila nadlaktične kosti i veže se na palmarnu aponeurozu. On nateže palmarnu aponeurozu čime posredno sudjeluje u fleksiji prstiju te sudjeluje u fleksiji dlana.

Iz stražnje lože mišića polaze: ekstenzor prstiju, *m. extensor digitorum*; ekstenzor malog prsta, *m. extensor digiti minimi*; i ekstenzor kažiprsta, *m. extensor indicis*. *M. extensor digitorum* i *m. extensor digiti minimi* polaze od lateralnog epikondila humerusa, lateralnog kolateralnog ligamenta *lig. collaterale laterale* i prstenastog ligamenta *lig. anulare radii*. Ekstenzor prstiju se veže na dorzalnu aponeurozu od drugog do petog prsta koju i tvori, te također daje vezivne tračke koji se vežu blizu baza proksimalnih članaka prstiju. Ekstenzor malog prsta se priključuje dorzalnoj aponeurozi petog prsta. Ekstenzor kažiprsta polazi s distalne trećine dorzalne strane lakatne kosti, *facies dorsalis ulnae* i s međukoštane membrane, *membrana interosea* i tetivom se veže na kažiprst.

Iz radijalne lože polaze mišići koji ne pokreću ni jedan prst.



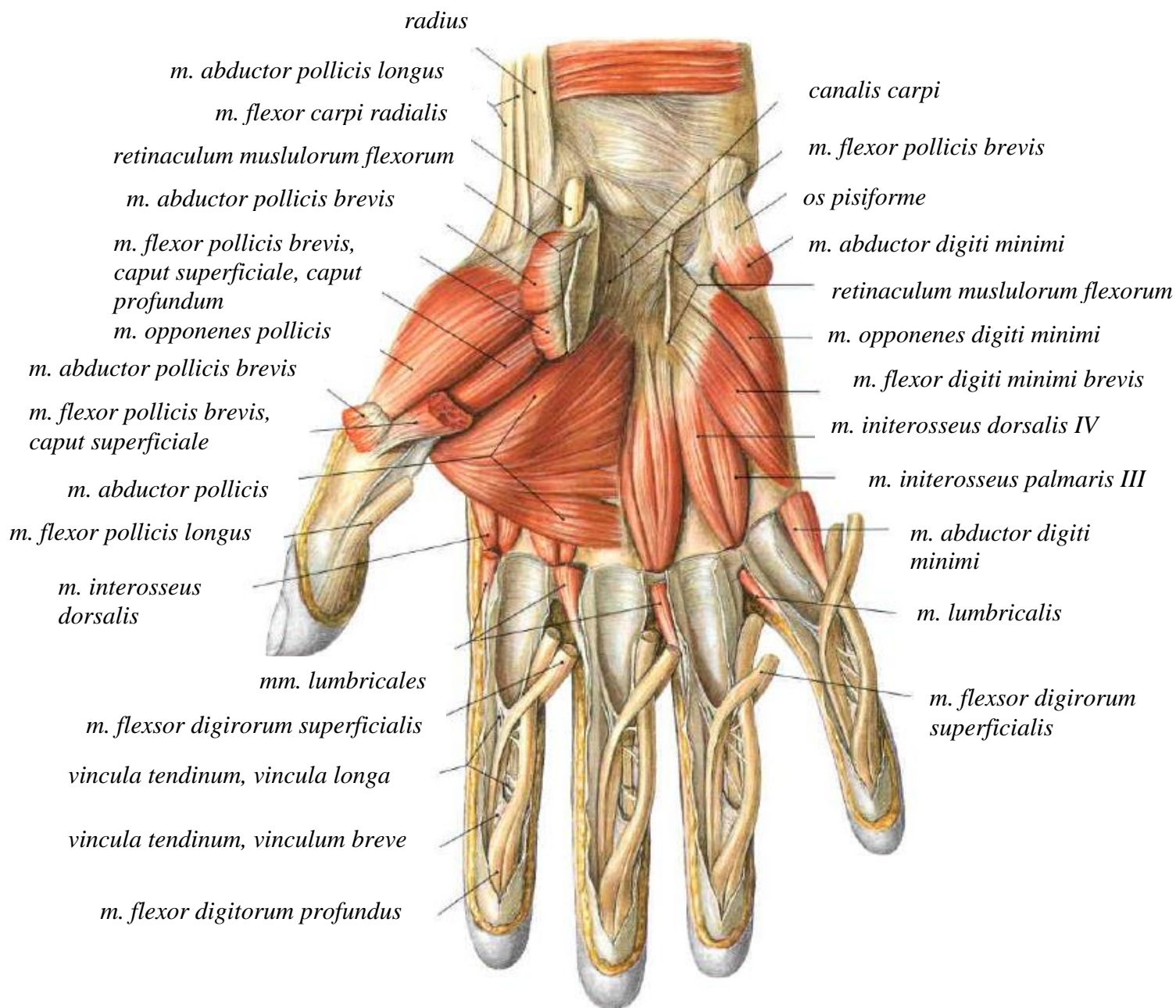
Slika 4 Dugi mišići šake, prednja loža i dio radijalne lože [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]

1.4. Položaj tetiva dugih mišića u odnosu na falnealne kosti šake

Tetive dugih mišića prednje lože prikazane su na Slici 5 Položaj tetiva mišića podlaktice u šaci [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.] i nalaze se u sluznim ovojnica, *vaginae synoviales digitorum manus*, a te ovojnice se nalaze u fibroznim ovojnica, *vaginae fibrosae digitorum manus*. Ovojnice počinju proksimalno od MCP zgloba i sežu do kraja tetiva mišića FDP. Fibrozna ovojnica osigurava položaj tetiva u odnosu na kosti i prenosi

opterećenja nastala uslijed položaja prstiju dok su dugi mišići napeti uz pomoć križnih i prstenastih ojačanja. Ta ojačanja dozvoljavaju mala gibanja tetive u smjeru okomitom na njenu os.

Kod srednje i distalne falange se nalaze kratki tračci fibroznog tkiva između tetive mišića FDP i kosti: *veniculum tendineum longum et breve*. Oni su doduše kratki i nenategnuti, a funkcija im nije prenositi opterećenja, nego provoditi krvne žile i živce.



Slika 5 Položaj tetiva mišića podlaktice u šaci [Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.]

1.5. Podjela mišića prema pomaku zglobova

Prema položaju i funkciji, mišići ruke se dijele na fleksore i ekstenzore zglobova prstiju. Kako svi dugi mišići fleksori prstiju dijele istu ovojnicu kroz koju prolaze, oni će biti opisani istim biomehaničkim modelom. Mišići koji sudjeluju u ekstenziji prstiju II do V su FDP i FDS.

Ekstenzori nemaju svoju ovojnicu. Unatoč tome, kako ekstenziju prstiju čine samo tri mišića; i tetive ekstenzora kažiprsta i ekstenzora malog prsta prate tetive ekstenzora prstiju, one će također biti opisane jednim biomehaničkim modelom.

Zglobovi koji su razmatrani su MCP, PIP i DIP i svaki od njih dozvoljava fleksiju i ekstenziju.

2. LANDSMEEROVI MODELI TETIVA PRSTIJU KAO SUSTAV REMENICA

2.1 Tetive prstiju kao sustava remenica

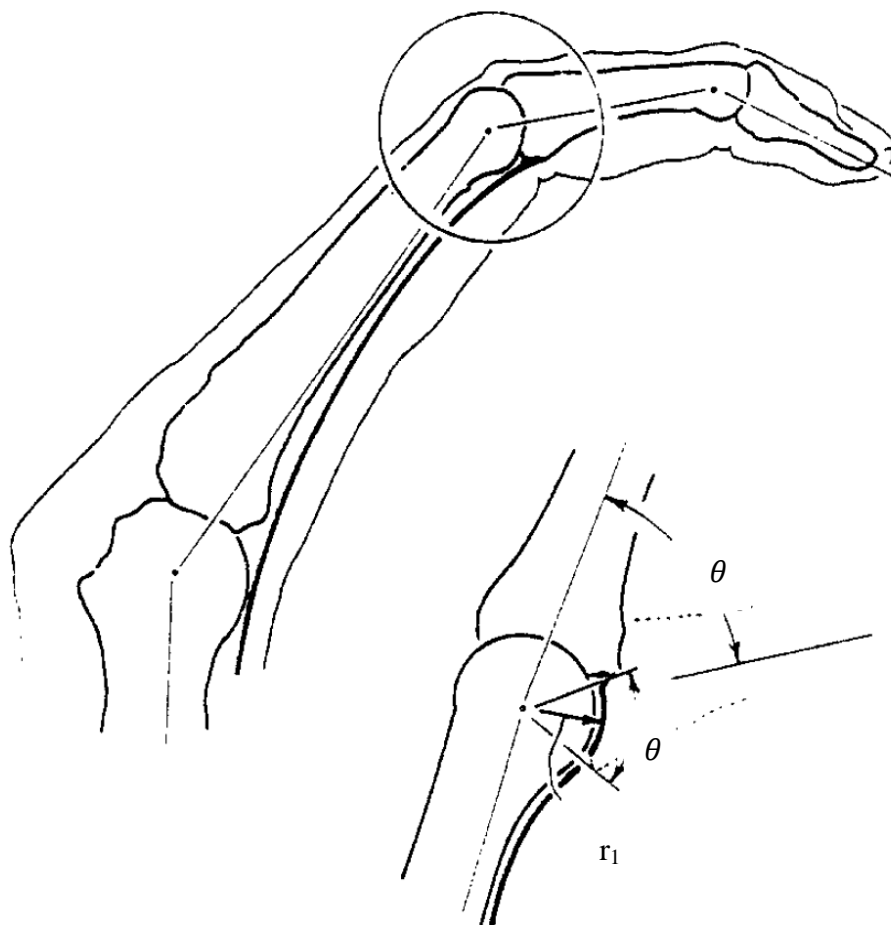
Tetive su distalno vezane na proksimalne krajeve falangi. Prolaze kroz otvore *vaginae synoviales digitorum manus* koje osiguravaju njihov položaj u odnosu na kosti uz koje se nalaze. Njihovo gibanje unutar ovojnice je slobodno duž aksijalne osi. Tetive se na svojim distalnim krajevima vežu za baze srednjih i distalnih falangi prstiju. Njihovim kretanjem se uspostavlja gibanje prstiju. Iako postoji radijalno gibanje sinovijalnih vagina u kojima se nalaze tetive, takvog gibanja nema ako su tetive prednapregnute. Iz tog razloga se za sva razmatranja i uspostavljanja biomehaničkih modela razmatraju prednapregnute tetive.

2.2 Landsmeerovi modeli

Razvijeni su mnogi biomehanički modeli šake, ali su za rješavanje većine njih potrebne dimenzije unutarnjih tvorbi šake poput pomaka tetiva ili naprezanja kojim su opterećene tetive. Budući da postoje brojne varijacije u dimenzijama šake među ljudima i da se te dimenzije ne mogu lako mjeriti kod živih ljudi, takvi modeli nisu razvijeni. Landsmeer je opisao tri biomehanička modela kojima aproksimira vezu između pomaka tetiva i pomaka članaka prstiju. Ti modeli će biti nazvani Model I, II i III.

2.3 Model I

Model I opisuje ligamente FDP i FDS koji su položeni uz kost i prate konturu kosti u PIP i DIP zglobovima prema Slici 6 Prikaz Landsmeerovog Modela I [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.].



Slika 6 Prikaz Landsmeerovog Modela I [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.]

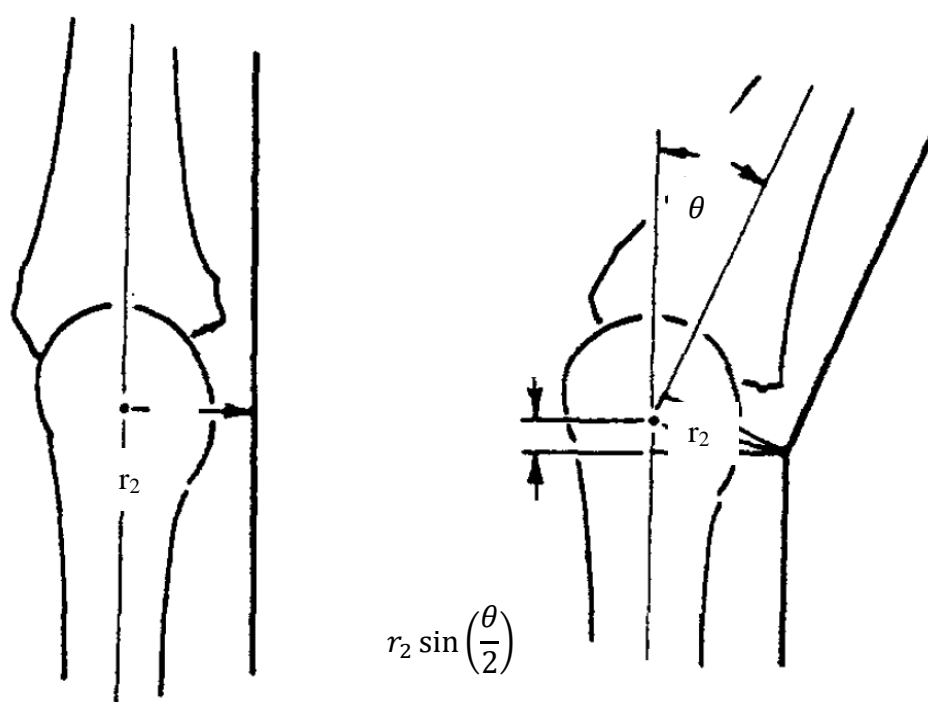
Oblici zglobova su aproksimirani na valjkaste kutne zglobove. Takvi zglobovi imaju rub koji prati kružnicu s centrom u osi rotacije zgloba. Za takav zglob su Landsmeer i Fischer pokazali da je pomak tetiva jednak:

$$x = r_1 \cdot \theta \quad (1)$$

gdje je x jednak pomaku tetive, a θ je kut koji zatvaraju kosti u zglobu. Krak momenta tetive oko zgloba jednak je udaljenosti tetive od centra rotacije zgloba. Prema prvom Landsmeerovom modelu je centar zakrivljenosti proksimalnog tijela modela jednak centru rotacije zgloba. Stoga su krak tetive i radijus r_1 jednaki. Ako položaj ligamenta nije osiguran i ako ligament ne prati konturu kosti kod zgloba pri njegovoj fleksiji, aproksimacija nije jednako točna. Ovaj slučaj je uzet u obzir u druga dva Landsmeerova modela.

2.4 Model II

Model II pretpostavlja da postoji geometrijska granica koju tetiva ne može proći i koja sprječava tetivu da bude uz konturu kosti u zglobu kako je prikazano na Slici 7 Prikaz Landsmeerovog Modela II [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.].



Slika 7 Prikaz Landsmeerovog Modela II [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.]

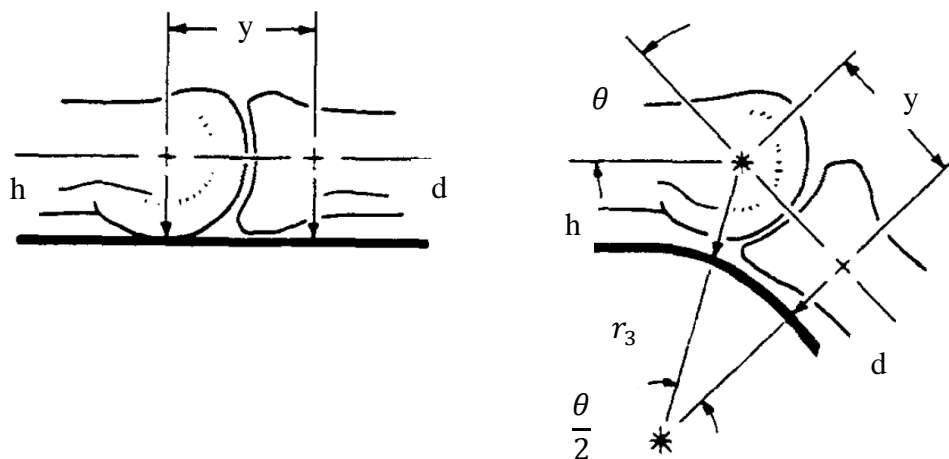
U idealnom slučaju geometrijsko ograničenje prepolovljuje kut u zglobu na takav način da se u zglobu tetive zamjenjuju s dva pravca koji se tamo sijeku. Prema tim uvjetima su pomaci zgloba i tetiva vezani sljedećom jednačinom (2):

$$x = 2r_2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

gdje su x pomak tetive, r_2 udaljenost geometrijskog sjecišta tetiva od središta rotacije zgloba, a Θ je kut između kostiju zgloba od neutralnog položaja. Kod ovog modela je krak momenta sile u tetivi oko zgloba jednak radijusu r_2 .

2.5 Model III

Dok Model I i Model II aproksimiraju pomak tetive u prstima kroz njihove ovojnice *vaginae synoviales*, Model III dopušta kretanje te ovojnice. Taj fenomen se naziva *bowstringing*. Da bi se uračunala pojava *bowstringing*-a, mehanički model zahtjeva više veličina. One su: udaljenost tetive od središta rotacije zgloba h ; i duljina osi kosti od središta rotacije zgloba do početka zakrivljenja tetive. U Modelu III je stoga pretpostavljeno da tetive djelomično prate konturu zgloba kako je prikazano na Slici 8 Prikaz Landsmeerovog Modela III [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.].



Slika 8 Prikaz Landsmeerovog Modela III [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.]

Odnosi pomaka tetive i zloba su prikazani jednađbom (3):

$$x = y \cdot 2 - r_3 \cdot \theta \quad (3)$$

$$r_3 = y \cdot \operatorname{ctg} \frac{\theta}{2} - d \quad (4)$$

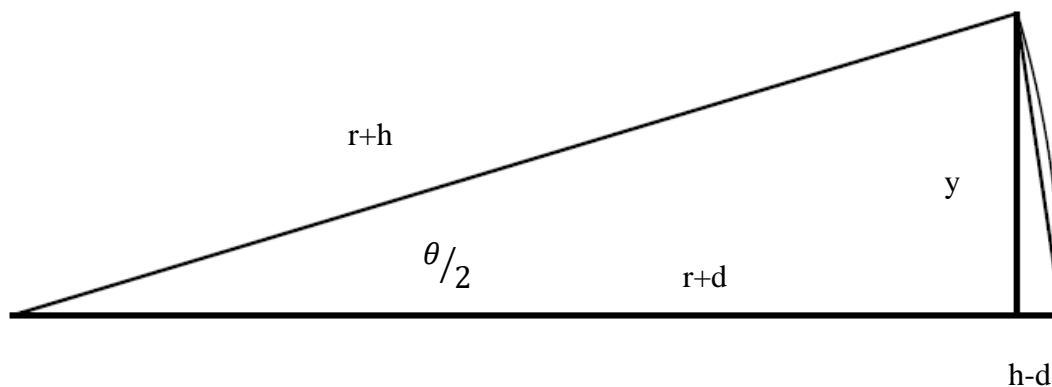
Uvrštavanjem jednađbe (4) u jednađbu (3) dobije se ovisnost pomaka tetive kakvog je opisao Landsmeer:

$$x = \theta \cdot d + y \cdot \left(2 - \theta \cdot \operatorname{ctg} \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (5)$$

Za male kutove ($\theta < 40^\circ$), $(2 - \theta \operatorname{ctg}(\theta/2))$ je skoro linearan; dok za veće kutove ovaj član uvodi nelinearnost. Zbog toga je Landsmeer ustvrdio da je Model I prihvatljiva aproksimacija Modela III.

Krak momenta tetive oko zgloba h jednak je udaljenosti tetive od centra rotacije zgloba. Veličina h direktno je povezana s pojavom *bowstringing*-a. Veza udaljenosti tetive od centra rotacije zgloba h i geometrije i položaja zgloba jednaka je jednađbi (6) prema Slici 9 Geometrija zgloba Modela III:

$$\frac{h - d}{y} = \tan \frac{\theta}{4} \quad (6)$$



Slika 9 Geometrija zgloba Modela III

Kako vrijedi jednačba (7) njenim uvrštavanjem dobiva se utjecaj *bowstringing*-a na Model III u jednačbi (8):

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} \quad (7)$$

$$h = y \cdot \left[\frac{1 - \cos(\theta/2)}{\sin(\theta/2)} \right] + d \quad (8)$$

2.6 Usporedba Modela I, II i III

U analiziranom radu [Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.] su mjereni pomaci od šesnaest različitih kuteva na zglobovima DIP i PIP te MCP. Rezltati su

Prema eksperimentalnim podacima Model I postiže najpreciznije podatke pri tetivama ekstenzora jer je na tim tetivama ograničena pojava *bowstringing*-a. Na tetivama fleksora je precizniji Model III jer dopušta pojavu *bowstringing*-a.

3. Procjena naprezanja i opterećenja tetiva prstiju pri slobodno penjanju

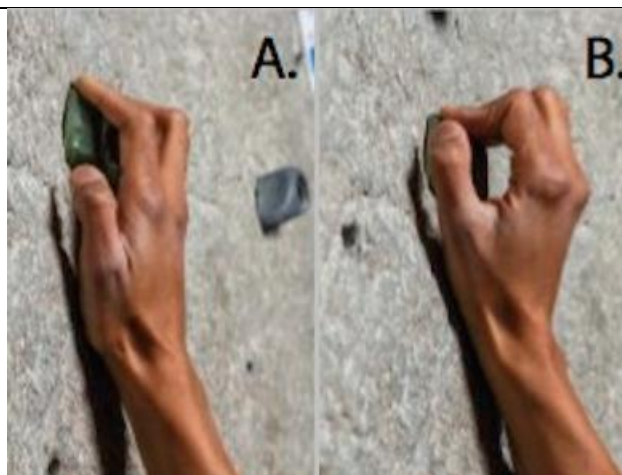
Uz poznato opterećenje, mora se ustvrditi položaj prstiju kako bi se moglo ustvrditi opterećenje tetiva. Ovdje će se sagledati načešći oblik šake pri slobodnom penjanju, pri kojem su MCP, PIP i DIP zglobovi u fleksiji, tj. DIP u ekstenziji.

Radi pojednostavljenja se neće razmatrati račvanje tetive mišića FDS te će se promjena poprečnog presjeka tetiva aproksimirati jednom površinom. Također se neće razmatrati tetiva mišića *m.extensor digitorum communis* jer sudjeluje u značajno manjem obujmu na prijenos sile pri slobodnom penjanju u hvatovima koji se analiziraju.

3.1 Slobodno penjanje

Slobodno penjanje je sport u kojem se penjači penju uz najčešće kamene površine i pri tome koriste opremu poput užeta i klinova radi osiguranja od ozljeda, a ne za penjanje. Radi međusobnog osiguranja se penje u paru. Penjač postavlja klinove i spitove te na njih postavlja uža koje će ga, uslučaju pada, amortizirati i zadržati u zraku. Drugi kraj užeta ima osiguravatelj i on stoga stoji obično ispod penjača na polici ili sidru.

Pri slobodnom penjanju se najčešće koriste hvatovi (u daljnjem tekstu *grip*-ovi) kakvi su prikazani na Slici 10 Najčešći *grip*-ovi [<https://theclimbingdoctor.com/rock-climbing-pulley-injury/>].

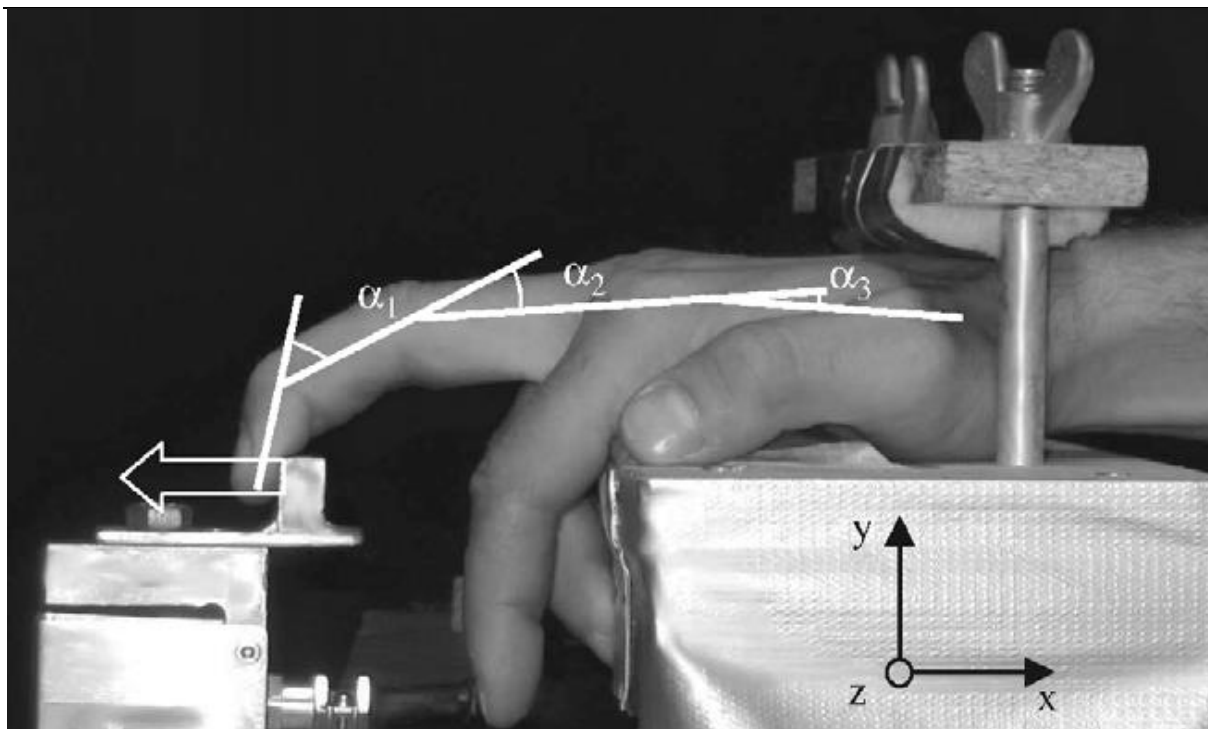


Slika 10 Najčešći *grip*-ovi [<https://theclimbingdoctor.com/rock-climbing-pulley-injury/>]

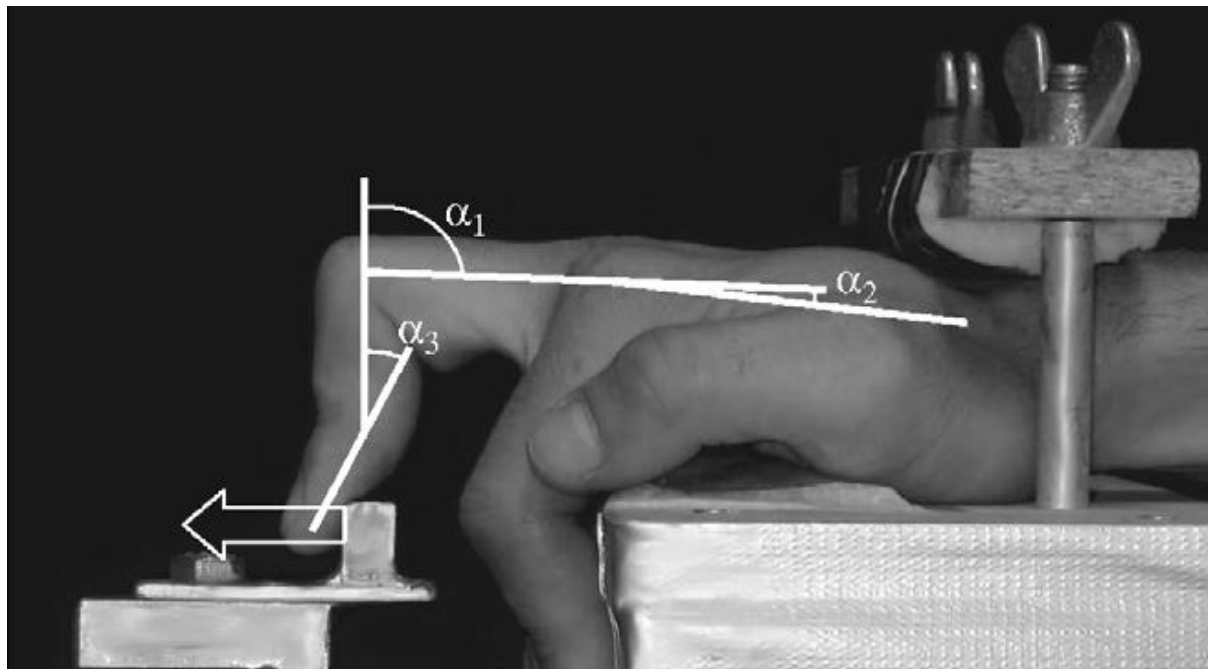
3.2 Mjerenje sile na vrhu prstiju

Mjerenje sile na vrhu prsta je rađeno fiksiranjem šake prema Slici 11 Šaka stabilizirana u položaj A za mjerenje [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.] i Slici 12 Šaka stabilizirana u položaj B za mjerenje [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.] i mjerenjem maksimalne sile koja se može postići. Mjeren je srednji (treći) prst jer u razmatranim položajima šake sposoban prenijeti najveću silu. Uz opterećenje na vrh prsta, mora se ustvrditi međusobni položaj falangi prstiju kako bi se moglo ustvrditi opterećenje tetiva.

Pri slobodnom penjanju pojavljuju se pojave koje nisu razmatrene ovim radom, a one uključuju: silu trenja između tetiva i ovojnica u kojima se nalaze; silu trenja između vrhova prstiju i njihove podloge; te silu trenja koja se javlja na cijeloj dodirnoj površini šake i podloge.



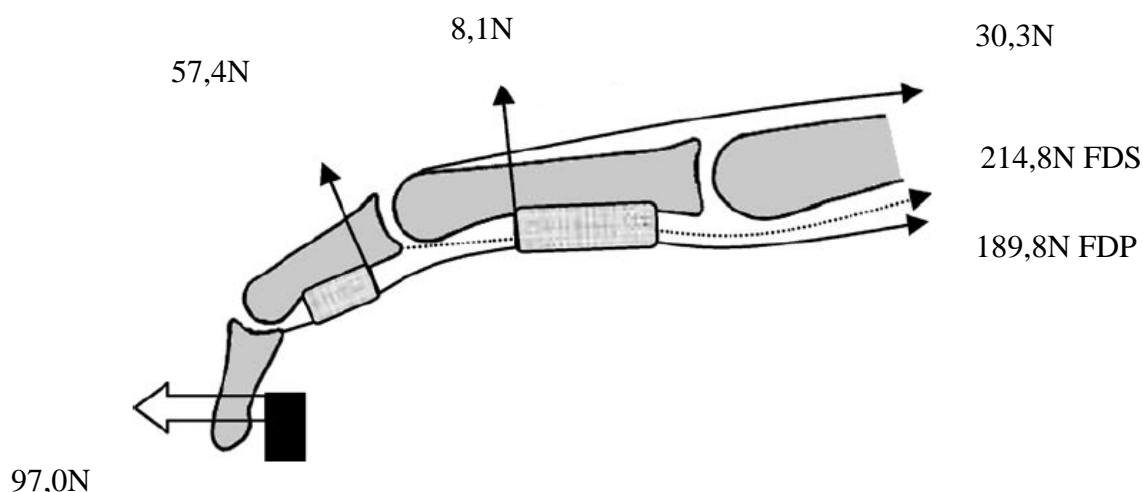
Slika 11 Šaka stabilizirana u položaj A za mjerenje [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]



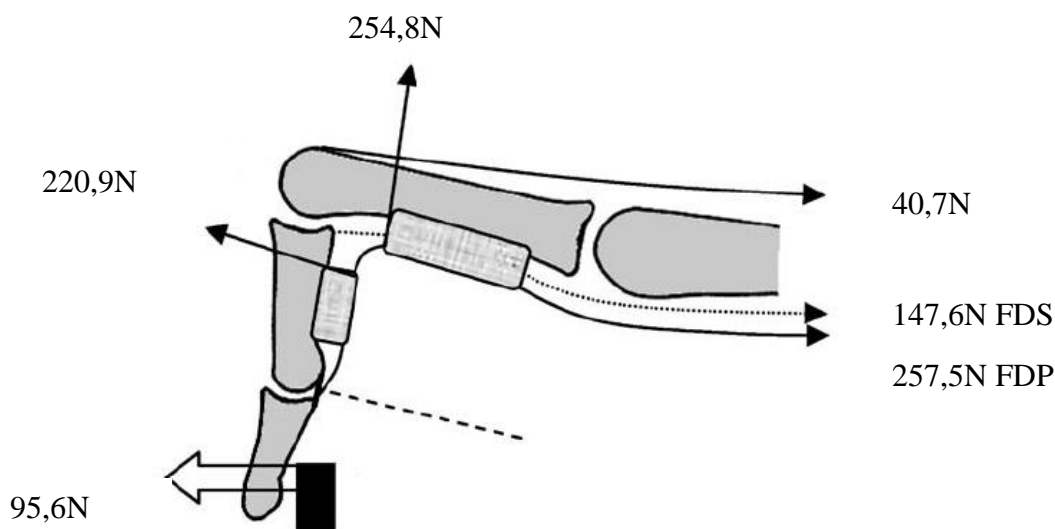
Slika 12 Šaka stabilizirana u položaj B za mjerenje [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]

3.3 Model tetiva kao sustav remenica

Na Slici 13 Model tetiva u položaju A [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.] i Slici 14 Model tetiva u položaju B [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.] su razrađeni modeli tetiva prstiju pomoću izmjerenih kuteva i opterećeni postignutim silama. Odmah je jasno uočljivo da uz sličnu silu na krajevima prstiju postoje značajne razlike u silama koje se javljaju u ligamentima koji osiguravaju položaj ovojnice u kojima se tetive nalaze.



Slika 13 Model tetiva u položaju A [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]



Slika 14 Model tetiva u položaju B [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.]

3.4 Procjena naprezanja u tetivama

Sile koje se javljaju u tetivama su analizirane u radu Vigouroux *et al* [Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.] iznose 404,6 N za položaj A i 405,1 N za položaj B, raspodjeljenih na tetive FDP i FDS. Ovisno o položaju prstiju, raspodjela varira. Kako se površina tetiva mijenja po duljini prsta, uzeta je prosječna površina poprečnog presjeka tetiva FPS kod medijalne falange i ona iznosi 8 mm² [Fanghanel, Pera, Anderhuber, Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, Zagreb, 2009.] te prosječna površina poprečnog presjeka tetiva FDS kod proksimalne falange i ona također iznosi 8 mm². Prema tim podacima, naprezanje se računa prema jednadžbi (9)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (9)$$

te iznosi:

$$\sigma_{FDP1} = 23,73 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{FDS1} = 26,85 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{FDP2} = 32,19 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{FDS2} = 18,45 \text{ MPa}$$

4. ZAKLJUČAK

Opisane su strukture šake koje utječu na fleksiju i ekstenziju prstiju te modeli koji opisuju pomak tetive u svojoj ovojnici. Konačno, analizirani su rezultati mjerenja šake u dva položaja karakteristična za slobodno penjanje te su uspoređene u kontekstu oblika koje se pojavljuju u prstima i šaci. Rezultati pokazuju da razlika među dvama prikazanim tehnikama penjanja ne utječe značajno na silu koja se prenosi na podlogu, ali može značajno utjecati na zdravlje tvorbi koje obuhvaćaju tetive i osiguravaju njihov položaj.

LITERATURA

- [1] Werner Platzer, Anatomski atlas 1 (Priručni), Zagreb, 2011.
- [2] Fanghanel, Pera, Anderhuber, Nitsch, Waldeyerova anatomija čovjeka, Zagreb, 2009.
- [3] Sobotta, Atlas of Human Anatomy, Muenchen, 2008.
- [4] Armstrong, Thomas J., Chaffin, Don B: An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons, 2015.
- [5] Mizrahi, J., Shoham M., Dayan J: A biomechanical model of indeks finger dynamics, 2016.
- [6] Vigouroux, L., Quaine, F., Moutet, F., Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport – climbing grip techniques, 2006.
- [7] <https://theclimbingdoctor.com/rock-climbing-pulley-injury/>, 2017.

PRILOZI

I. CD-R disc